

无缝钢管淬火感应加热过程的数值模拟*

黄 军, 武文斐, 王宝峰, 李建超

(内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 利用中频电流的钢管感应加热工艺具有感应加热时间短, 温度控制精确, 环境友好等优点, 已经广泛应用到钢管的淬火、弯曲等方面。针对某一典型品种无缝钢管淬火感应加热过程, 特别是不同加热段采用不同频率下, 进行数值模拟, 获得钢管在整个加热过程中温度场的变化过程。利用该模型可以对感应加热过程参数进行优化, 从而对无缝钢管淬火感应加热工艺的制定提供参考依据。

关键词: 无缝钢管; 感应加热; 数值模拟; 淬火

中图分类号: TG156.3; TG162.84 文献标识码: B 文章编号: 1001-2311(2010)05-0066-04

Numerical Simulation of Induction-heating Process for Quenching of Seamless Steel Tube

Huang Jun, Wu Wenfei, Wang Baofeng, Li Jianchao

(School of Environment and Energy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Induction heating process of seamless steel tube with midfrequency features short heating time, precise temperature control and environment-friendly operation, having been widely used for such purposes as steel tube quenching and bending, etc. Following the induction-heating process for quenching of a certain typical type of seamless steel tube, and in particular the variation of frequencies for each different heating section, numerical stimulation is conducted, which leads to the identification of the temperature field change during the entire heating process of the tube. Thanks to the said simulation model, the operating parameters of induction heating process can be optimized, which in turn provides relevant important reference data as basis for establishing proper induction-heating process for quenching of seamless steel tubes.

Key words: Seamless steel tube; Induction heating; Numerical simulation; Quenching

0 引 言

利用中频电磁感应加热装置对无缝钢管进行感应加热, 在欧美发达国家已经是一种较成熟的工艺技术, 并且在石油专用管制造领域得到了广泛的应用, 例如美国的 TIMKEN 公司、LONGSTAR 公司, 日本川崎钢铁公司等都有自己的钢管感应加热热处理生产线^[1-3]。当前, 我国应用感应加热钢管技术才刚刚起步, 例如, 无锡的西姆莱斯石油专用管制造有限公司 2006 年在国内建设了一条石油专

用管感应加热热处理线, 在加热区都使用中频感应加热设备对钢管进行感应加热。同时, 电磁感应加热也广泛应用到钢管的扩径、弯曲等方面。感应加热以电能作为能源, 避免了排放二氧化碳及其他有害气体, 因此环境友好。同时, 感应加热钢管升温快、效率高、温度控制精确, 易于实现自动化, 生产组织灵活方便, 节省了燃气加热钢管时炉子升降温所需要的时间及消耗。因此感应加热方法被认为是最有发展前途的钢管加热方式, 拥有广阔的应用前景。

本文以典型的 45 钢无缝钢管(外径 88.9 mm, 壁厚 6.45 mm)的感应加热过程作为研究对象, 在建立的三维磁场、温度场及它们之间的耦合的数学模型基础上, 采用有限元法计算感应加热过程中钢

* 基金项目: 内蒙古高等学校科学技术研究项目(NO. NJ09088), 内蒙古科技大学创新基金(2009NC051)

黄 军(1980-), 男, 讲师, 主要从事冶金热处理过程研究。

管内部温度场的变化^[4-5]，为制定合理的感应加热工艺提供参考依据。

1 物理数学模型及求解方法

1.1 物理模型

为了真实模拟钢管感应加热过程中温度的变化，对钢管和加热器进行实际尺寸建模，钢管外径为 88.9 mm，壁厚为 6.45 mm。考虑到加热线圈具有一定匝数，将加热线圈虚拟成一个圆环。对于钢管长度方向，为了减小计算量，取钢管的加热长度为 240 mm，加热器的长度为 200 mm。建立模型如图 1 所示。



图 1 无缝钢管感应加热模型示意

1.2 数学模型

在钢管感应加热过程中，加热线圈在钢管内部和周围空气中要产生交变的电磁场，描述电磁场的基本方程^[6]如下：

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (4)$$

式中 ∇ ——哈密顿算符；

H ——磁场强度，A/m；

J ——电流密度，A/m²；

D ——电通量密度，C/m²；

E ——电场强度，A/m；

B ——磁感应强度，T；

t ——时间，s。

钢管加热过程中，按照能量守恒定律，具有内热源的三维瞬态温度场的固体导热微分方程^[7]：

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \quad (5)$$

式中 T ——钢管的温度，℃；

ρ ——钢管的密度，kg/m³；

λ ——钢管的导热系数，W/(m·K)；

C_p ——材料的比热容，J/(kg·K)；

φ ——内热源生成的热量，J。

1.3 加热无缝钢管的材料物理特性

在感应加热过程中无缝钢管的温度变化非常大，材料物理特性会随温度的改变而变化，为了模拟结果更好的符合实际情况以及计算的准确度，建立钢管材料物理特性随温度变化的数表。使用的材料物理特性包括材料的相对磁导率、电阻率、导热系数和比热容，具体参数见表 1。

表 1 材料物理参数随温度的变化^[4]

温度 /℃	相对磁导率	电阻率×10 ⁻⁶ / (Ω·m)	导热系数 / [W·(m·K) ⁻¹]	比热容 / [J·(kg·K) ⁻¹]
20	200	0.198	47.68	472
100	195	0.254	43.53	480
200	186.6	0.339	40.44	498
300	178.1	0.435	38.13	524
400	167.1	0.541	36.02	560
500	154.9	0.656	34.16	615
600	137.8	0.790	31.98	700
700	92.5	0.949	28.66	854
720	33	0.982	27.49	916
742	11	1.019	26.20	986
760	1	1.042	25.14	1 064
800	1	1.080	26.49	806
900	1	1.162	25.92	637
1 000	1	1.200	24.02	602

1.4 载荷及边界条件

在感应加热过程中，对加热线圈施加交变电流，其中电流频率为 300~600 Hz，电流大小为 2 000 A。磁场的边界条件设为感应加热线圈周围空气的外表面节点的磁力线与外表面平行；钢管的初始温度设定为 25℃，对于钢管加热过程中表面的对流

和辐射换热, 考虑综合换热系数, 取 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 对于钢管内表面, 按绝热面处理。

1.5 求解方法

应用基于有限单元法的商业软件 ANSYS, 在建立好模型后对模型进行网格划分, 钢管、加热线圈所用的是六面体单元, 周围空气用的是四面体单元, 共计单元 173 752 个, 节点 362 895 个。考虑到钢管感应加热过程的集肤效应, 对于厚度为 6.45 mm 的钢管壁厚, 取 10 层网格, 钢管的网格总数为 40 000 个。网格划分如图 2 所示。

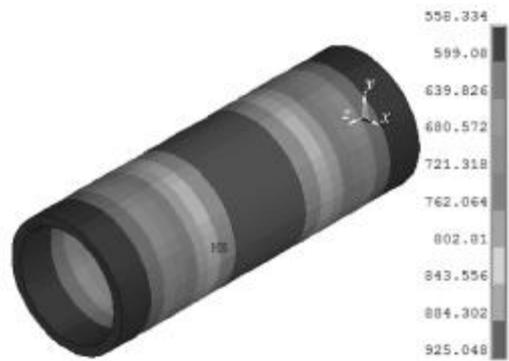


图 2 钢管和加热器网格划分示意

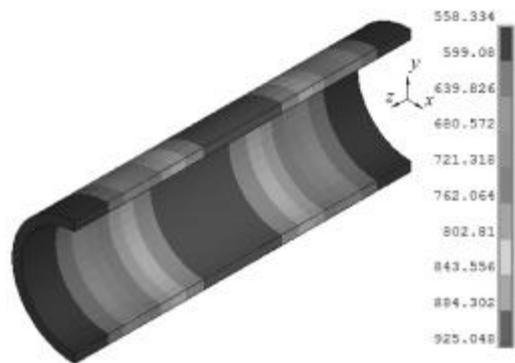
在确定控制方程和边界条件后, 首先进行电磁场的求解, 电磁场在钢管内部产生一定的感应电流焦耳热, 根据钢管内部各部分自身产生热量的大小, 再根据热传导方程, 考虑边界条件, 计算求解, 从而确定钢管内部温度场的分布情况。

2 模拟结果与讨论

图 3 所示为钢管内外表面的温度场分布。图 3 (a)所示为无缝钢管在频率 600 Hz 下, 经过 180 s 加热后, 外表面温度场的分布。由图 3(a)可以看出, 钢管的最高加热温度可以达到 920 °C 以上, 钢管端部的温度较低, 这是由于端部磁场作用比较弱的缘故。模拟时感应加热器长度只有 200 mm, 在实际加热过程中增大加热器线圈长度, 则钢管高温区可以扩大, 即在钢管中部的温度变化可以反映钢管在全尺寸加热线圈下温度的变化。图 3(b)所示为钢管轴向切片, 反映了钢管内表面温度场的分布。由图 3(b)可以看出, 钢管在经历 180 s 的加热后, 钢管内外表面温度分布相同, 在钢管壁厚方向上没有温度梯度存在。



(a) 外表面



(b) 内表面

图 3 钢管内外表面的温度场分布

图 4 所示为钢管在不同频率下, 钢管中部内表面温度的变化过程。可以看出, 加热频率越高, 加热速度越快; 300, 450, 600 Hz 在材料磁性转变温度以下钢管的加热速度分别为 5.4, 7.9, 10.5 °C/s。随着钢管温度上升, 当达到钢管的磁性转变温度 760 °C 左右, 材料相对磁导率已经降低为 1, 加热效率降低, 钢管的温升速度明显降低。

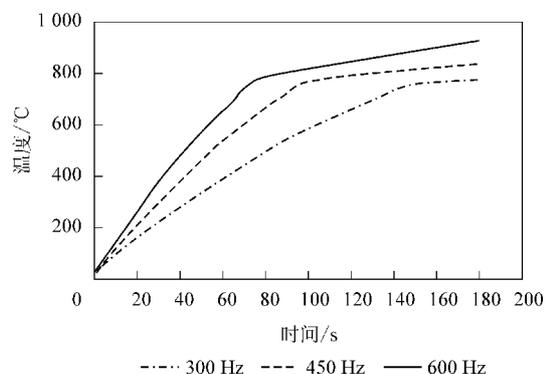


图 4 不同加热频率下钢管内表面的温度变化

在实际的工程应用中,为了提高钢管在磁性转变温度以上的加热效率,一般采用提高频率的方式保持较高的加热速度。针对实际工程应用,在加热一段选取加热频率为 300 Hz,加热时间 140 s;加热二段选取加热频率 1 000 Hz,加热时间为 40 s,进行数值模拟。

图 5 为加热区组合频率下,钢管中部内外表面温度随时间的变化。由图 5 可以看出,钢管在整个加热过程中几乎以相同的加热速度上升,内外表面的温度差在加热后期也趋于 0,钢管温度趋于均匀一致。钢管加热速度为 6.6 °C/s,经过加热一段 140 s 后,钢管温度为 745 °C;经过加热二段 40 s 后,钢管温度为 918 °C。在这里合理的频率组合是关键,通过加热区选取的不同频率组合,可以保证钢管在加热过程中加热速度的一致性,保证钢管在加热过程中加热速度在磁性转变点的平滑过渡。

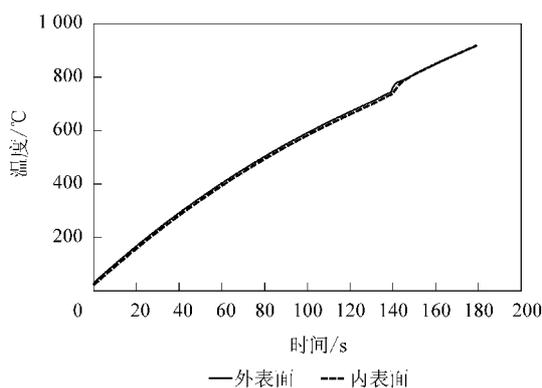


图 5 在组合频率下钢管中部内外表面温度变化

由实际工程中加热一段终了温度为 725 °C,加热二段终了温度为 900 °C 可知,模拟结果是可信的。利用该模型,通过数值模拟,可以对不同品种无缝钢管淬火感应加热过程的参数进行优化,为制定合理的工艺参数提供依据。

3 结 论

(1) 通过建立无缝钢管淬火感应加热磁-热耦合模型,能够很好地预测钢管温度场的瞬时分布,获得钢管内部温度场的变化。在 300, 1 000 Hz 的组合频率下,钢管内外表面的温度以 6.6 °C/s 增加,在加热后期内外表面温度趋于一致。通过与实际工程中钢管的加热温度对比可知,模拟结果是可信的。

(2) 数值模拟结果能够体现磁性转变温度对加热效率的影响,为了保证合理的加热速度,必须选择合理的加热频率组合。通过模拟可以看出实际应用的频率组合是合适的。

(3) 通过无缝钢管的感应加热数值模拟,可以有针对性地制定钢管淬火感应加热制度。

4 参考文献

- [1] 王三云. 钢管中频感应加热热处理的优点及最新技术[J]. 焊管, 2001, 24(3): 41-47.
- [2] 黄大鑫. 钢管热处理方法的新发展——感应加热热处理[J]. 钢管, 1994, 23(6): 51-55.
- [3] 张居勤, 严雪荣. 感应加热技术在钢管热处理工艺中的应用[J]. 钢管, 2010, 39(2): 52-56.
- [4] 赵敏. 45 钢坯锻前感应加热的有限元模拟分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2006.
- [5] Sadeghipour K, Dopkin J A, Li K. A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel[J]. Computers in Industry, 1996 (28): 195-205.
- [6] Guru B S, Hiziroglu H R. 电磁场与电磁波[M]. 周克定, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

(修定日期: 2010-07-23)

● 信 息

湖南衡阳钢管(集团)有限公司特大管坯项目热负荷试车成功

经过 8 个多月的紧张建设,2010 年 8 月 30 日,湖南衡阳钢管(集团)有限公司特大管坯项目热负荷试车取得成功。该特大管坯项目投产后,可年产 $\Phi 400\sim 800$ mm 的特大圆坯 15 万 t,实现 $\Phi 720$ mm 周期轧管机组坯料自供,对深化品种结构调整、促进 $\Phi 720$ mm 周期轧管机组达产达效将起到强有力的推动作用。

(湖南衡阳钢管(集团)有限公司 刘启增)